

Зав'ялов В. Л.

Запорожець Ю. В.

Бодров В. С.

Мисюра Т. Г.

Попова Н. В.

**Національний  
університет  
харчових  
технологій**

УДК 664.061.4:084

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗОВНІШНЬОГО МАСООБМІНУ ПРИ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

*Представлены результаты исследования влияния режимных параметров на внешний массообмен при непрерывном виброэкстрагировании целевых компонентов из растительного сырья. Показана возможность использования для этих целей модельного сырья с диффузионным типом растворения.*

*The results of research of influence of regime parameters are presented on external mass-transfer at continuous vibroextracting of having a special purpose components from a digister. Possibility of the use for these aims of model raw material is rotined with the diffusive type of dissolution.*

Для обґрунтування способу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини або при конструюванні чи виборі раціональних режимів роботи екстракційної апаратури важливо знати її масообмінні характеристики, особливо ступінь інтенсивності зовнішнього масообміну, що характеризується коефіцієнтом масовіддачі [1]. При цьому, різноманітність задач, пов'язаних з оцінюванням ефективності масообміну та складність механізму процесу призвели до того, що теорія оцінювання зовнішньої дифузії відстає від вимог промислової практики. Аналіз публікацій на цю тему свідчить, що діючі методики не надають конструкторам повної відповіді в кожному конкретному випадку. Що стосується коефіцієнта масовіддачі, то ця величина не стільки характеризує процес дифузії, скільки враховує її умови, а його визначення надто складне з точки зору інженерної практики. У зв'язку з цим пошук більш простих методів оцінювання зовнішнього масообміну на сьогодні є доцільним.

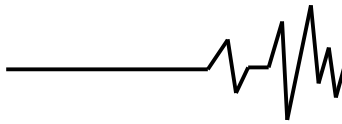
Наведені у статті отримані дані з цього важливого для інженерії питання переконливо ілюструють можливість використання методу оцінювання зовнішнього масообміну в твердофазових екстракторах, запропонованого

проф. Лободою П.П. для оцінювання ефективності процесу розчинення в умовах перемішуванні [2].

В умовах твердофазового екстрагування цільових компонентів із рослинної сировини, зокрема, при накладанні низькочастотних механічних коливань, якісним показником ефективності дії пульсуючих турбулентних струменів може бути прийнятим коефіцієнт розчинення модельного зразка, виготовленого з речовини з дифузійним типом розчинення [3].

На підставі викладеного та з метою визначення коефіцієнту масовіддачі нами готувались зразки кристалогідрату сірчаноокислого алюмінію  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  правильної циліндричної форми діаметром 14 мм, висотою 22 мм із вкритими бакелітом торцями.

Дослідження проводились на вібраційному екстракторі безперервної дії (рис.1), [4]. Підготовлені зразки за допомогою спеціального тримача розміщували в міжтарілчастому просторі робочого об'єму апарата, заповненому розчинником (вода при температурі 20 °C). Керованими факторами, що впливали на гідродинамічну ситуацію в апараті, були: амплітуда (5, 10, 15 мм) та частота (2...5 Гц) коливань вібротранспортувальної системи.



Зразок закріплювали на різних відстанях  $L$  від нульового рівня поверхні нижньої тарілки (120, 160, 200, 250 мм). Такий вибір точок розміщення зразків обумовлено тим, що у випадку їх розташування безпосередньо над верхньою частиною гнучкого патрубку 4 (рис.1) або безпосередньо під транспортувальним елементом (соплом) верхньої тарілки ефективність дії пульсуючих струменів рідини призводить до руйнування зразка.

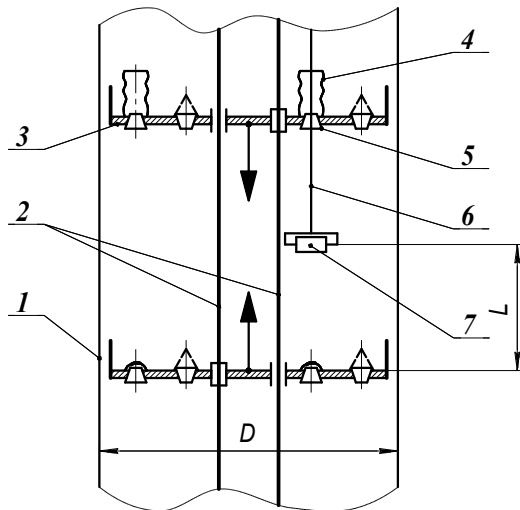


Рис. 1. Схема розміщення модельного зразка в робочому об'ємі віброекстратора:

- 1 – колона;
- 2 – штоки;
- 3 – вібраційний пристрій (тарілка);
- 4 – гнучкий патрубок;
- 5 – транспортувальний елемент (сопло);
- 6 – тримач;
- 7 – дослідний зразок

В умовах дифузійного розчинення речовин найбільший опір масопередачі має місце на ділянці перенесення маси від поверхні розчинюваного тіла до рідини, що зумовлено високою швидкістю міжфазової взаємодії. В цьому випадку загальний коефіцієнт масовіддачі практично дорівнює коефіцієнту швидкості процесу розчинення ( $K_m$ ) та може бути визначений за формулою [2]:

$$K_m = \frac{2 \cdot \sqrt{G_0} \cdot (\sqrt{G_0 - \theta/2} - \sqrt{G_1 + \theta/2})}{F_0 \cdot (C_H - C) \cdot \tau} \text{ м/с}, \quad (1)$$

де  $G_0$  – початкова маса зразка до розчинення, кг;  $\theta$  – зміна маси зразка за час введення його в апарат і виведення з нього, кг;  $G_1 = G_0 - \theta - m$

– маса зразка після його виведення з апарата, кг;  $m$  – маса речовини зразка, яка перейшла в розчин за час перебування в точці розміщення;  $F_0$  – еквівалентна площа поверхні розчинення зразка,  $\text{м}^2$ ;  $C_H$  і  $C$  – відповідно, концентрація насичення на поверхні зразка і концентрація речовини в основній масі розчинника,  $\text{кг/м}^3$ .

При розчиненні поодиноких невеликих за розміром зразків речовин, що добре розчиняються у порівняно великому об'ємі води, величиною  $C$  можна знехтувати, оскільки вона є незначною [2].

Процес масовіддачі в апараті з вібраційним пристроєм можна описати за допомогою критеріального рівняння масовіддачі:

$$Nu_D = \text{tg } \alpha \cdot Re_B \cdot Pr_D^{0.5}, \quad (2)$$

де  $Nu_D$  – дифузійний критерій Нуссельта, що характеризує вплив коливань на швидкість масовіддачі, або

$$Nu_D = (K_m - K_{m0}) \cdot d_s / D_D; \quad (3)$$

$\alpha$  – кут нахилу графіка функції  $\frac{Nu_D}{Pr_D^{0.5}} = f(Re_B)$

відносно вісі абсцис;  $Re_B$  – вібраційний критерій Рейнольдса, що характеризує гідродинамічну обстановку в апараті з вібраційним пристроєм:

$$Re_B = \frac{w_0 \cdot d}{\nu_c \cdot (1 + L/D)^{2+0.5 \cdot 10^6 \cdot \mu_c^2}} \quad (4)$$

$Pr_D$  – дифузійний критерій Прандтля:

$$Pr_D = \nu_c / D_D \quad (5)$$

$D_D$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\mu_c$  і  $\nu_c$  – коефіцієнт, відповідно, динамічної ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) і кінематичної ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) в'язкості розчинника;  $d_s$  – еквівалентний діаметр розчинюваного зразка, м;  $d$  – діаметр отвору транспортувального елемента тарілки, м;  $D$  і  $L$  – відповідно, діаметр апарата і відстань між точкою розміщення зразка та 0-рівнем вібраційного пристрою (тарілки), м;  $K_{m0}$  – коефіцієнт масовіддачі (складова загального коефіцієнта масовіддачі  $K_m$ ), який характеризує дію вільної конвекції і молекулярної дифузії в умовах низькочастотних коливань),  $\text{м/с}$ ;  $w_0$  – швидкість пульсуючих



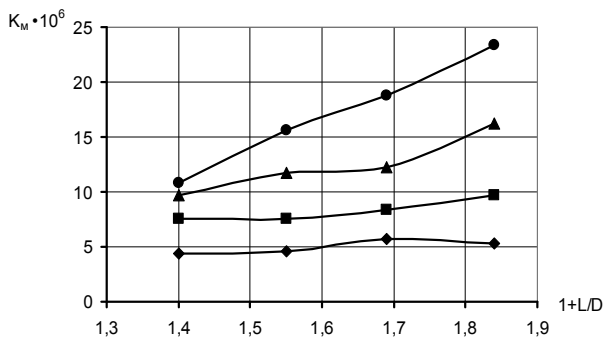
струменів в площині отвору транспортувального елемента тарілки:

$$w_0 = \frac{2 \cdot A \cdot f \cdot P}{1 - P}, \text{ м/с}; \quad (6)$$

$A, f$  – відповідно, амплітуда ( $m$ ) та частота коливань ( $Гц$ ) вібраційного пристрою;  $P$  – частка неживого перерізу тарілки в зоні її встановлення, (для тарілок, використаних під час дослідження, комплекс  $\left(\frac{P}{1-P}\right)$  становить

8,5).

В результаті проведення експериментів та обробки дослідних даних побудовано графічні залежності, що наведені на рис.2.



**Рис. 2. Залежність загального коефіцієнта розчинення від відносного віддалення точки розміщення зразку  $\left(1 + \frac{L}{D}\right)$  при різних частотах коливань вібротранспортувальної системи:**  
 ◆ –  $f = 2 \text{ Гц}$ , ■ –  $f = 3 \text{ Гц}$ ,  
 ▲ –  $f = 4 \text{ Гц}$ , ● –  $f = 5 \text{ Гц}$

Аналіз наведених графічних залежностей (рис.2) вказує на таке: в інтервалі зони відносного віддалення  $\left(1 + \frac{L}{D}\right)$  від 1,40 до 1,56 інтенсивність дії пульсуючих струменів залишається практично сталою при сталих  $f = 2...3 \text{ Гц}$ , хоча збільшення частоти від 2 до 3  $Гц$  веде до зростання коефіцієнта масовіддачі  $K_m$  на  $\square 53$  відсотків; на цьому ж інтервалі  $\left(1 + \frac{L}{D}\right)$  із збільшенням частот від 3 до

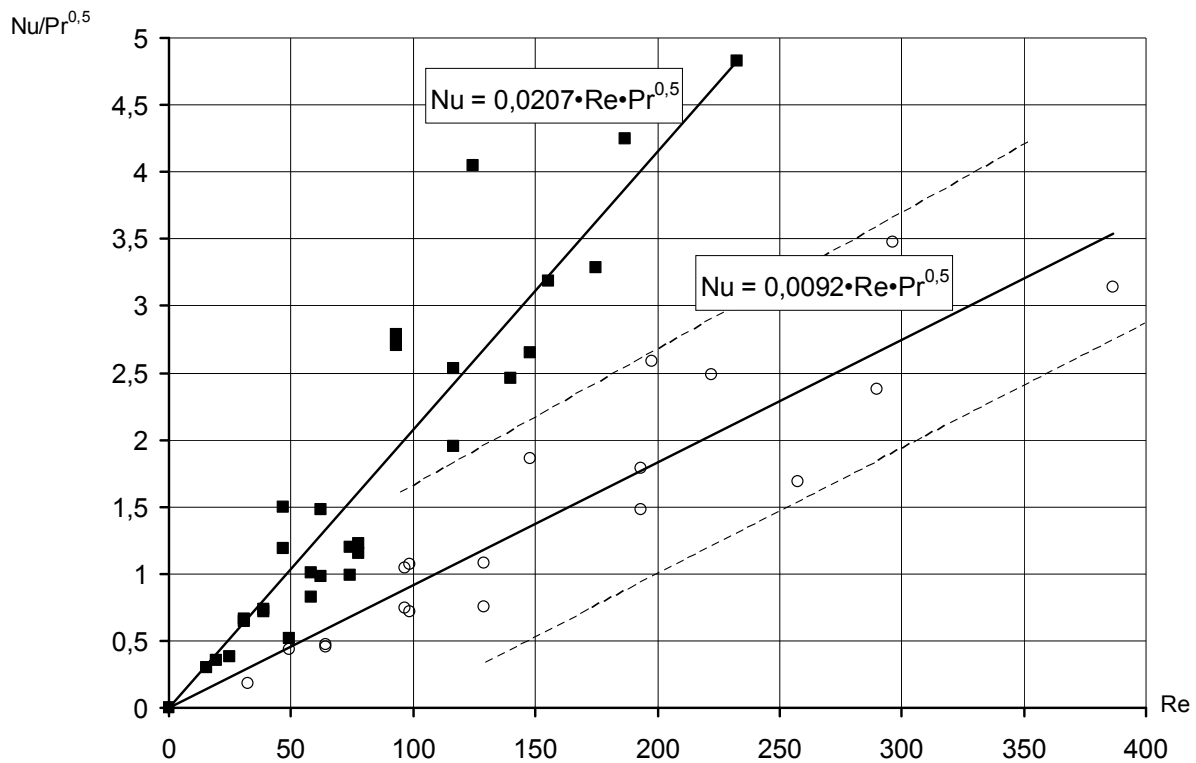
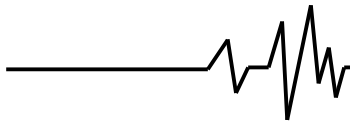
5  $Гц$  тенденція відносного зростання  $K_m$  зберігається і частково розвивається в напрямку його зростання. Така тенденція зростання  $K_m$  спостерігається на інтервалі зміни  $\left(1 + \frac{L}{D}\right)$  від 1,56 до 1,85. При цьому інтенсивність зміни  $K_m$  збільшується при зміні частот від 3 до 5  $Гц$  внаслідок накладання дії пульсуючих потоків, що генеруються нижньою та верхньою тарілками.

З такого аналізу та за попередньо викладеними аналітичними залежностями побудовано графічне зображення функції  $\frac{Nu_D}{Pr_D^{0.5}} = f(Re_B)$  для умов, зокрема, ефективності

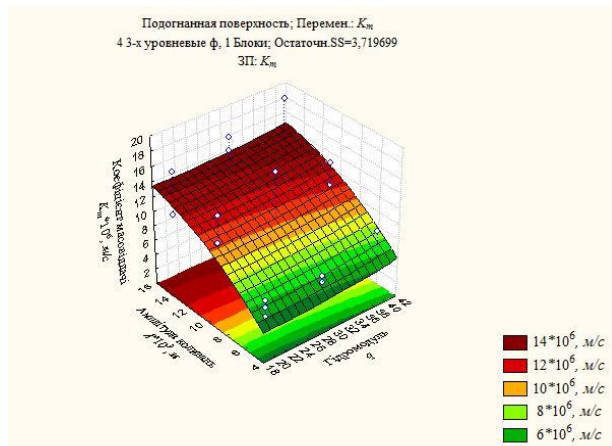
дії струменів, генерованих нижньою тарілкою та сумісною дією верхньої та нижньої тарілок, яка апроксимується відповідними критеріальними рівняннями (рис.3).

За аналогічною методикою та алгоритмом, в який було введено модифіковане рівняння критерію Рейнольдса (яке враховує наявність двофазової системи рідина – тверде тіло) було проведено дослідження на системі вода – хмельова сировина при гідромодулі, що становив 20, 30, 40.

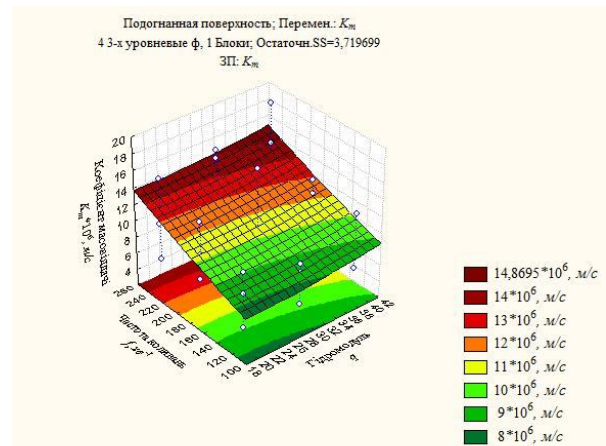
Для встановлення залежності коефіцієнта масовіддачі від основних режимних параметрів процесу та для подальшого визначення оптимального режиму екстрагування для такої системи розроблено математичні моделі процесу у вигляді поліномів другого порядку. З цією метою було використано результати виконаних чотирьохфакторних активних експериментів за матрицею трьохрівневого напіврепліки плану типу  $N = 3^{4-1}$ . В якості керованих факторів були наступні: амплітуда коливань ( $A = 0.05 \dots 0.3 \text{ м}$ ); частота коливань тарілок ( $f = 2...5 \text{ Гц}$ ); гідромодуль ( $q = 20...40$ ); відстань між точкою розміщення зразка до 0-рівня тарілки ( $L = 0.05 \dots 0.3 \text{ м}$ ). Дисперсійні та регресійні аналізи множин досліджених даних виконувались за допомогою статистичного пакету Statistica 6.1Ru. За допомогою цього ж пакету було отримано графіки тривимірних зображень поверхонь відгуку коефіцієнта масовіддачі (рис.4-7).



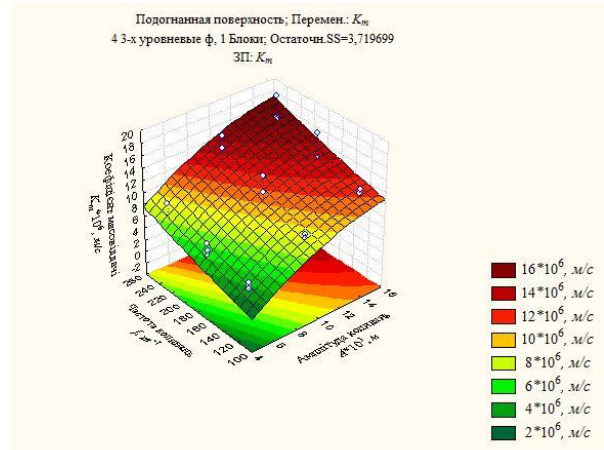
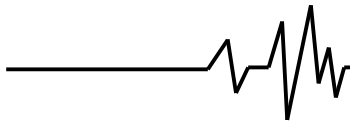
**Рис. 3. Узагальнення експериментальних даних по дослідженню ефективності дії пульсуючих турбулентних струменів при віброекстрагуванні:**  
 ■ – зона сумісної дії нижньої та верхньої тарілок;  
 ○ – зона дії нижньої тарілки; ---- – зона дії верхньої тарілки



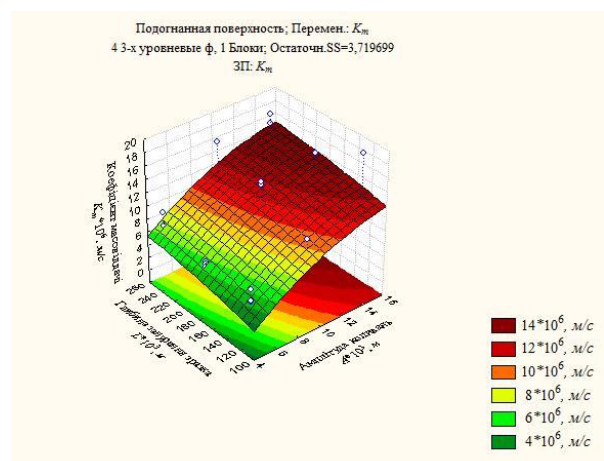
**Рис. 4. Поверхня відгуку за математичною моделлю залежності коефіцієнта масовіддачі від гідромодуля і амплітуди при фіксованих значеннях на 0-рівнях варіювання частоти коливань та глибини занурення зразка**



**Рис. 5. Поверхня відгуку за математичною моделлю залежності коефіцієнта масовіддачі від гідромодуля і частоти коливань при фіксованих значеннях на 0-рівнях варіювання амплітуди коливань та глибини занурення зразка**



**Рис. 6. Поверхня відгуку за математичною моделлю залежності коефіцієнта масовіддачі від амплітуди і частоти коливань при фіксованих значеннях на 0-рівнях варіювання гідромодуля та глибини занурення зразка**



**Рис. 7. Поверхня відгуку за математичною моделлю залежності коефіцієнта масовіддачі від амплітуди і глибини занурення зразка при фіксованих значеннях на 0-рівнях варіювання гідромодуля та частоти коливань**

Отримана математична модель залежності коефіцієнта масовіддачі від основних режимних параметрів процесу віброекстрагування має вигляд

$$K_m = -11,9551 - 0,0758 \cdot q + 0,0021 \cdot q^2 + 1,6722 \cdot A - 0,045 \cdot A^2 + 0,0237 \cdot f + 0,0381 \cdot L - 0,0011 \cdot L^2 \quad (7)$$

та може бути використана для оцінювання впливу режимних параметрів в раніше наведених інтервалах їх варіювання на зовнішній масообмін при віброекстрагуванні цільових компонентів із хмельової сировини.

Таким чином, одночасний вплив на процес турбулентних пульсуючих струменів, генерованих транспортувальними елементами верхньої та фільтрувальними елементами нижньої тарілок сприятиме інтенсифікації зовнішнього масообміну в системі вода – хмельова сировина у кілька разів, але цей вплив повинен бути локальним, оскільки він може привести до виникнення повздовжньої нерівномірності структури потоку в масштабі всього апарата. За таким, доцільним можна рекомендувати проведення процесу в режимі: амплітуда коливань до  $15 \cdot 10^{-3}$  м; частота коливань тарілки 2,5 – 3 Гц; відстані між тарілками, що визначена відносним віддаленням  $\left(1 + \frac{L}{D}\right)$  в межах 1,5 – 2; гідромодулем 20 – 30.

**Висновок.** Викладені результати досліджень та методика їх проведення можуть бути корисними при встановленні інтенсивності зовнішнього масообміну в умовах твердофазового екстрагування в екстракторах безперервної дії з різними вібраційними системами, в тих випадках, коли швидкість процесу лімітується зовнішнім масообміном.

**Література**

1. Лысянский В.М. Процесс экстракции сахара из свеклы /Лысянский В.М. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 222 с.
2. Лобода П.П. Исследование массоотдачи от твердых тел к жидкости в аппарате с вибрирующим устройством: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: /Лобода Павел Петрович. – К., 1966. – 182 с.
3. Зав'ялов В.Л. Математична модель зовнішнього масообміну періодичного віброекстрагування з рослинної сировини / В.Л. Зав'ялов, О.П. Лобок, Н.В. Попова, В.С. Бодров // наукові праці ОНАХТ: зб. Нау. Праць /Одеська національна академія харчових технологій. – Одеса, 2008. Вип. 32.– с. 88 – 93.
4. Патент 86485 Україна, МПК В 01 Д 11/02. Вібраційний екстрактор /Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В. Бодров В.С. - № а2007 07563; заявл. 05.07.07; опубл. 27. 04. 09. Бюл. №8.